

## 施回流型気流層石炭ガス化炉の設計手法の開発

著者	森原 淳
号	1303
発行年	1992
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10110">http://hdl.handle.net/10097/10110</a>

氏 名	森 原 淳
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 4 年 7 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 56 年 3 月 東京大学工学部化学工学科卒業
学 位 論 文 題 目	旋回流型気流層石炭ガス化炉の設計手法の開発
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 齊藤正三郎    東北大学教授 松本 繁 東北大学教授 三浦 隆利

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

わが国は、二度にわたる石油危機の経験から、エネルギー供給の安定化を図るため、エネルギー源の多様化を推進してきた。しかし、現在でも一次エネルギー供給の 8 割以上を輸入に依存し、その供給構造は依然として脆弱である。このため、引き続き石油依存度の低減に努め、エネルギー需要構造の安定・強化を図ることが必要不可欠である。こうした観点から、原子力とともに石炭の需要拡大が期待されている。とくに石炭は石油などに比較して確認可採埋蔵量が豊富であり、地域的偏在も少ないことなどから供給安定性に優れており、石油代替エネルギーの重要な柱として位置付けられている。

この石炭を用いて、2000 年以降に実現が期待される高効率な発電方式の一つに、石炭ガス化複合発電システムがある。従来の石炭火力発電ではスチームタービンだけの発電であるのに対し、このシステムではガスタービンを駆動できる。ガスタービンは、スチームタービンよりも高温で駆動できるので、高い熱効率を実現できる。

この石炭ガス化複合発電システムにおける石炭ガス化炉の主要な課題は、高いガス化効率及び速い負荷追従性の達成である。このガス化効率と負荷追従性の観点から、固定層、移動層、流動層、気流層及び溶融層などのガス化炉を比較してみると、気流層では、粒子を気流中に浮遊させながら高温で反応させることにより反応時間の短縮と高い炭素転換率を図ることが期待できる。高温で反応させるので炭素転換率が高く、滞留時間が数秒であるため負荷追従性も高い。更に、石炭灰分の溶融温度以上で反応させれば、灰分中の有害な金属を溶融灰（スラグ）に封じ込めて排出できるため環境に対しても優れている。

この気流層において、気固接触時間を向上させる手法として遠心力を用いた旋回流型気流層ガス

化炉の開発を考えた。炉内を旋回流にすることで装置内における石炭粒子の滞留時間を大きくし、比較的低い温度で炭素転換効率の向上を図ることができる。また、燃焼反応とガス化反応を分離した2段反応とすることにより、生成ガスの燃焼を避けるとともに層全体の平均温度を下げて冷ガス効率の向上を図ることもできる。以上より、石炭ガス化炉の中では旋回流型気流層が、大量の石炭を処理できるうえ炭素転換率を高くでき、また負荷追従性も高いので発電用のガス化炉に適していると判断し、開発に着手した。

通常の気流層石炭ガス化炉では、炭素転換率は優れているが、高温反応であるため熱損失が大きく冷ガス効率を向上させるには、熱分解の残渣であるチャーを炉内に長時間滞留させ、比較的低温度でカーボンガス化率を向上することが必要である。そこで、筆者等は一つの反応器内で、燃焼とガス化を分離させて行う1室2段反応型気流層石炭ガス化方式を提案した。本方式は、下段バーナ付近で石炭とガス化剤による燃焼反応を行わせ、上段バーナ付近では、酸素量を極めて少なくして石炭の乾留、ガス化反応を行わせる。更に下段付近の燃焼反応により温度を局部的に高くして石炭中の灰分を溶融させ、生成したスラグの排出を促進させるというものである。この方式を実現させるには、未反応粒子を長時間炉内に滞留させるよう炉を適切に設計し、操作条件の最適化を図る。

既往の研究において旋回流型気流層の開発に関しての研究は発表されているが、旋回流型気流層の設計にとってもっとも重要な、旋回流中での粒子滞留機構、粒子滞留時間の推算方法に関しては検討されていない。一方、粒子挙動解析の基礎となる旋回流の実験的、或いは数値解析による極めて基礎的な研究に関しては発表されているが、より実際の装置形状と旋回流の関係、或いはスケールアップ手法等にまで発展させた研究は見当たらない。そこで本研究では、旋回流型気流層石炭ガス化炉における粒子の滞留機構、乱流場の流れ解析を常温流れモデルによる実験結果に基づき解明を試み、更にここで得られた知見をもとに実際のガス化炉への適用について検討した。

## 第2章 常温流れモデル炉による気流層内流動状態の測定

ガス化炉の成績に及ぼす炉形状や石炭バーナ供給条件の影響を評価するには、炉内の気固接触状態を把握する必要がある。一般に炉内の粒子及び気体の流れは、炉形状や石炭バーナ供給条件から、気体と粒子についての運動方程式と連続の式を解くことで求められる。しかし、気流中に複数の粒子がある場合には、粒子間の相互作用があるため、現象は極めて複雑である。さらに本研究で対象とする気流層内の気体流れは、複雑な旋回流である。したがって、粒子の気固接触状態を把握するには、粒子と気体の流れをある程度モデル化する必要がある。

そこで、ガス化炉を模擬した常温流れモデル炉を製作し、ガス速度分布と粒子滞留時間を測定した。3次元速度分布は、3線式熱線風速計で測定した。粒子滞留時間は、パルス状にトレーサ粒子を供給し、出口に設置した光散乱式濃度計で測定した過渡応答より算出した。常温流れモデル炉の形状に関しては、出口径、上段バーナ高さ、及び下段バーナ旋回円径を変化させた。石炭バーナ供給条件については、全供給量に対する上段バーナ供給量の比率、上段バーナ噴出速度、及び下段バーナ噴出速度を変化させ、以下の結果が得られた。

- (1) 全ガス量を増大させると平均粒子滞留時間は減少した。

- (2) 上段ガス量を増大させると平均粒子滞留時間は増大した。
- (3) 炉出口径を増大させると平均粒子滞留時間は減少した。
- (4) 上段バーナ高さを増大させると平均粒子滞留時間は減少した。
- (5) 上段バーナ噴出速度を増大させるほど、また下段バーナ噴出速度を減少させるほど平均粒子滞留時間は増大した。
- (6) 下段旋回円径を増大させると平均粒子滞留時間は減少した。

更に、以上の結果を角運動量（＝噴出速度×旋回円径×ガス量）で整理した。すなわち(1)～(6)の結果は角運動量比（＝下段角運動量／（上段角運動量＋下段角運動量））を増大させると粒子滞留領域は減少し、平均粒子滞留時間も減少することが分かった。これより、角運動量比が重要なパラメータとなることが示唆された。また、様々な炉形状、バーナ供給条件に対し速度分布を測定した結果、上段からの旋回流と下段からの旋回流が合流する位置及び出口径を境界として、炉内を分離してモデル化できることが明らかとなった。

### 第 3 章 旋回流のモデル化

旋回流型気流層石炭ガス化炉の効率を解析あるいは予測するには、炉内での気体と固体の接触状態の把握と反応速度の評価が必要である。第 2 章では、気流層の炉内の気体と固体の接触状態について実験的検討を行い、本装置内の気体と固体の接触特性を明確にできた。そこで、第 3 章では旋回流気流層の気体流れをモデル化し、気体速度分布を求めた。全体を 4 つの領域に分割し、上段バーナからの気体と下段バーナからの気体が合流する地点を上下の境界とし、出口径を半径方向の境界とした。出口径と中心の間を強制渦の領域とし、出口径と炉径の間を自由渦の領域とした。周方向速度分布は Burgers の渦による速度分布を用いた。

計算結果と実測値を比較し、以下の結果が得られた。

- (1) 運動量収支により算出した周方向速度は、異なる炉径での実測値と良好に一致した。
- (2) 周方向速度分布は Burgers の渦による速度分布で近似できた。
- (3) 自由渦と強制渦の境界の実測値は、出口径より中心側にあることが明らかとなった。

また、運動量収支から、上下の境界を算出し、上下段のバーナ付近を除いておおそ実測値を記述できることを示した。以上により、炉内の周方向速度分布などの流れに関して、炉形状寸法の変化に対応しはば算出できることがわかった。

### 第 4 章 粒子滞留時間の推算

上段バーナより供給した石炭粒子の炉内滞留時間をいかにして長くできるかが、本研究で開発を進めている気流層石炭ガス化炉の性能を大きく左右することになる。そこで、この第 4 章では、第 3 章の気体流れの解析結果に基づき粒子滞留時間の評価を試みる。本研究で対象とする炉では、粒子は炉壁から供給されて中心に向かい、出口径の内側では強い上昇流により粒子は速やかに排出される。したがって、粒子滞留時間は、粒子が炉壁から出口径まで移動するのにかかる時間とほぼ等しいと考えてよい。したがって本研究では、中心方向の粒子流れだけの 1 次元的な解析で粒子滞留

時間を算出することとした。

粒子の運動を、気流による流体力学的な力と乱流による拡散としてモデル化し、炉出口における粒子滞留時間を数値的に算出した。計算値を実測値と比較し、以下の結論が得られた。

- (1) 200φと700φの大きさの異なる炉について炉出口径の影響を評価した結果、実測値の概略の傾向を本モデルにより説明できた。
- (2) 下段旋回円径を増大させると境界高さが上昇して上段領域が減少し、上段バーナから噴出された粒子の滞留時間を減少させるが、その一方で炉全体の旋回力が増大し粒子滞留時間を増大させる。この両者の効果が相殺されるため、旋回円径をかえても粒子滞留時間は変化しない。この結果について本計算で説明できた。
- (3) 粒子滞留時間に及ぼす上段ガス量の影響及びバーナ噴出速度の影響を求めた結果、計算値は実測値をほぼ良好に表現した。

以上の方法により炉内の粒子滞留時間を算出できることがわかった。

## 第5章 基礎ガス化装置におけるガス化効率に及ぼす粒子滞留時間の影響

第5章では、最初に炭素転換率 $\eta_c$ （石炭中の炭素が、気体に変換された割合）を粒子滞留時間と石炭ガス化反応速度式により評価した。次に、反応平衡、物質収支からガス組成を推定し、冷ガス効率 $\eta_g$ （石炭の持つ発熱量に対する生成ガスの発熱量の割合）を求めた。そして、実際の気流層ガス化炉の運転結果と本章での計算結果との比較を行い、本解析法の妥当性を確認した。更に本手法を用いてガス化装置性能の詳細な検討を行い、最適なガス化炉の設計のための指針を得た。

炭素転換率及び冷ガス効率に及ぼす炉形状の影響を実測した。また、本研究で導いた各粒径に対する滞留時間の算出式により反応時間を算出し、ガス化反応速度式から各粒径に対する炭素転換率を算出して、実測値との比較を行った。その結果、炭素転換率の計算値は実測値と良好な相関を示した。また、物質収支と炭素転換率からガス組成を求め冷ガス効率を計算した結果、実測値をほぼ表現でき、計算により効率の予測ができる事が明らかとなった。

## 第6章 総 括

本研究の成果をまとめ総括とした。

## 審 査 結 果 の 要 旨

石炭ガス化複合発電システムには、負荷追従性が良く、効率の高いガス化炉が要求されている。本論文は、これらの課題を満足する一室二段旋回流型気流層石炭ガス化炉の設計手法の確立を目的として、ガス及び粒子の炉内流れを常温モデル炉を用いた実験により解析してモデル化し、ガス化反応速度及びシフト反応平衡と連立させてガス化効率を推算し、実験値と比較検討したもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、常温流れモデル炉を作成し、炉内のガス速度分布及び粒子滞留時間を測定している。また、粒子滞留時間に及ぼすバーナガス量、噴出速度、及び旋回円径の影響を角運動量により整理できることを明らかにしている。

第3章では、第2章の測定結果に基づいて炉内の流れをモデル化し、各領域での数学的記述を試みている。周方向速度分布は Burgers の渦により近似し、粒子滞留領域の最下端の算出に対しては、運動量のバランスにより決定している。本モデルによる計算値は、実測値をおおよそ記述できている。

第4章では、第3章において数学的記述したガス流れと、粒子の運動方程式から炉内の粒子滞留時間を推算し評価している。粒子の運動方程式は、乱流による拡散作用と遠心力を考慮した力学的なバランスから導いている。計算により得られた粒子滞留時間は、実測値を良好に説明している。

第5章では、実験室規模の石炭ガス化基礎試験装置を作成し、ガス化効率に及ぼす炉形状及び操作条件の影響を評価している。また、第4章で算出した粒子滞留時間と、ガス化反応速度式及びシフト反応平衡を連立させて、炭素転換率や冷ガス効率の予測を行っている。本計算の結果は、基礎試験装置で得られたガス化効率を良好に表している。

第6章は、本研究の総括である。

以上要するに本論文は、異なる規模のガス化炉において、炉形状や操作条件によりガス化効率を予測できる手法を開発したもので、化学工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として合格と認める。